

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra telekomunikační techniky

Využití transkonduktančního zesilovače  
Using of Transconductance Amplifier

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra telekomunikační techniky

## Zadání bakalářské práce

Student: **Dominik Klvaňa**

Studijní program: B2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor: 2601R013 Telekomunikační technika

Téma: **Využití transkonduktančního zesilovače**  
**Using of Transconductance Amplifier**

Zásady pro vypracování:

1. Uveďte definici a vlastnosti operačního transkonduktančního zesilovače (OTA).
2. Zpracujte přehled aplikací OTA.
3. S využitím školní stavebnice firmy RC prověřte obvodové chování některých základních zapojení s transkonduktančním zesilovačem zvoleného vyráběného typu.

Seznam doporučené odborné literatury:


- [1] GRISE, W. NMSU [online]. 1998 [cit. 2011-02-09]. Application of the Operational Transconductance Amplifier (OTA) to Voltage-controlled Amplifiers and Active Filters. Dostupné z WWW: <<http://engr.nmsu.edu/~etti/winter98/electronics/grise/wrg.html>>.
- [2] GEIGER, R.L; SÁNCHEZ-SINENCIO, E. Active filter design using operational transconductance amplifiers : A tutorial. *IEEE Circuits and devices magazine* [online]. 1985, 1, march, [cit. 2011-02-09]. Dostupný z WWW: <<http://amesp02.tamu.edu/~sanchez/ota-Tutorial1.PDF>>. ISSN :8755-3996.
- [3] Operational transconductance amplifier. In Wikipedia : the free encyclopedia [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 24. july 2006, last modified on 30. july 2010 [cit. 2011-02-09].

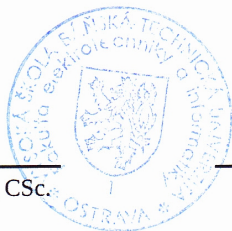
Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Dr.Ing. Libor Gajdošík**

Datum zadání: 18.11.2011

Datum odevzdání: 07.05.2013

  
prof. RNDr. Vladimír Vašínek, CSc.  
vedoucí katedry

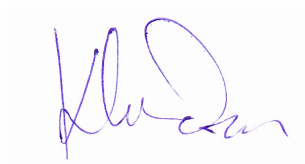


  
prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

## Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně.  
Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

Dne: 5.5.2013

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'Klucan', is centered on the page.

## Poděkování

Rád bych poděkoval Ing.Dr. Liboru Gajdošíkovi za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této bakalářské práce.

## Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá použitím transkonduktačního zesilovače v různých aplikacích. První část bakalářské práce obsahuje obecný popis, popis vnitřní struktury a fungování transkonduktačního zesilovače. Druhá část práce teoreticky popisuje sedm různých aplikací s použitím transkonduktačního zesilovače. Třetí a poslední část se zabývá praktickým měřením aplikací, které byly již teoreticky probrány v druhé části bakalářské práce.

## Klíčová slova

Transkonduktanční zesilovač, transkonduktance, řídicí proud  $I_{ABC}$ , napěťový zesilovač, integrátor, dolní propust, analogová násobička, analogová násobička s měnícím se  $I_{ABC}$ , napěťový zesilovač s linearizačními diodami, stereo regulátor hlasitosti, bipolární OTA, MOS OTA, linearizační diody, oddělovací zesilovač.

## Abstract

The Bachelor thesis discusses description of operational transconductance amplifier and its usage. First part of this thesis include general description as its inner structure description and functional description of operational transconductance amplifier. Second part analyze seven different applications used within operational transconductance amplifier. Third and final part show us measurements of applications, which are theoretically solved in second part of bachelor thesis.

## Key words

Transconductance amplifier, transconductance, control current  $I_{ABC}$ , voltage amplifier, integrator, low-pass filter, analog multiplier, analog multiplier with varying  $I_{ABC}$ , voltage amplifier with linearising diodes, stereo volume control, bipolar OTA, MOS OTA, linearising diodes, buffer.

## Seznam použitých symbolů, zkratk a termínů

Symbol	Jednotka	Význam symbolu
AC	A	Střídavý proud
C	F	Kapacita
DC	A	Stejnoseměrný proud
$g_m$	S	Transkonduktance
$I_{OUT}$	A	Výstupní proud
$I_{SET}, I_{ABC}$	A	Řídící proud
$K_U$	-	Napěťový přenos
k	-	Konstanta
OTA	-	Operational transconductance amplifier Operační transkonduktační zesilovač
$R_C$	$\Omega$	Odpor u řídícího proudu při společných řídících proudech
$R_D$	$\Omega$	Odpor u linearizačních diodách
$R_L$	$\Omega$	Odpor u výstupu
$R_m, R_{ABC}$	$\Omega$	Odpor u řídícího proudu
$U_C$	V	Napětí při zlomové frekvenci
$U_{max}$	V	Nejvyšší napětí
$U_{SET}, U_{ABC}, V_C$	V	Napětí přiváděné na transkonduktanci
$U_X$	V	Vstupní napětí
$U_Z$	V	Celkové napětí
$V_{D-}, V_{D+}$	V	Napětí na diodách
$V_{in+}$	V	Napětí na neinvertujícím vstupu
$V_{in-}$	V	Napětí na invertujícím vstupu
$V_S$	V	Napětí na vstupech
$V_T$	V	Tepelné napětí
$\omega$	$s^{-1}$	Úhlový kmitočet

# Obsah

1 Úvod.....	1
2 Transkonduktanční zesilovač.....	2
2.1 Princip fungování OTA.....	2
2.2 Neideální vlastnosti OTA.....	3
2.3 Bipolární OTA.....	4
2.3.1 Základní obvod bipolárního OTA.....	4
2.3.2 Zapojení s linearizačními diodami.....	5
2.3.3 Zapojení oddělovacího zesilovače (vyrovnávací nárazník).....	6
2.4 MOS-OTA.....	6
3 Aplikace OTA.....	7
3.1 Napěťový zesilovač.....	7
3.2 Integrátor.....	8
3.3 Dolní propust 1. řádu.....	8
3.4 Analogová násobička.....	9
3.5 Analogová násobička s měnícím se IABC.....	10
3.6 Napěťový zesilovač s linearizačními diodami .....	10
3.7 Stereo regulátor hlasitosti.....	11
4 Praktická část – Měření aplikací OTA.....	12
4.1 Napěťový zesilovač.....	12
4.1.1 Zadání měření.....	12
4.1.2 Schéma zapojení .....	12
4.1.3 Použité přístroje a zařízení.....	12
4.1.4 Postup laboratorního měření.....	13
4.1.5 Nastavené parametry.....	13
4.1.6 Naměřené hodnoty.....	13
4.1.7 Graf.....	14
4.1.8 Vypočtené hodnoty .....	14
4.1.9 Závěr.....	14
4.2 Integrátor.....	15
4.2.1 Zadání měření.....	15
4.2.2 Schéma zapojení .....	15
4.2.3 Použité přístroje a zařízení.....	15
4.2.4 Postup laboratorního měření.....	16
4.2.5 Nastavené parametry.....	16
4.2.6 Výpočet.....	16
4.2.7 Výstup z osciloskopu.....	17
4.2.8 Závěr.....	17



4.3 Dolní propust 1.řádu.....	18
4.3.1 Zadání měření.....	18
4.3.2 Schéma zapojení .....	18
4.3.3 Použité přístroje a zařízení.....	18
4.3.4 Postup laboratorního měření.....	19
4.3.5 Nastavené parametry.....	19
4.3.6 Naměřené hodnoty.....	20
4.3.7 Grafy.....	21
4.3.8 Výpočet.....	22
4.3.9 Závěr.....	23
4.4 Analogová násobička.....	24
4.4.1 Zadání měření.....	24
4.4.2 Schéma zapojení.....	24
4.4.3 Použité přístroje a zařízení.....	24
4.4.4 Postup laboratorního měření.....	25
4.4.5 Nastavené parametry.....	25
4.4.6 Výpočet.....	25
4.4.7 Výstup z osciloskopu.....	26
4.4.8 Závěr.....	26
4.5 Analogová násobička s měnícím se řídícím proudem IABC.....	27
4.5.1 Zadání měření.....	27
4.5.2 Schéma zapojení .....	27
4.5.3 Použité přístroje a zařízení.....	27
4.5.4 Postup laboratorního měření.....	28
4.5.5 Nastavené parametry.....	28
4.5.6 Výpočet.....	28
4.5.7 Výstup z osciloskopu.....	29
4.5.8 Závěr.....	30
4.6 Napěťový zesilovač si linearizačními diodami .....	31
4.6.1 Zadání měření.....	31
4.6.2 Schéma zapojení .....	31
4.6.3 Použité přístroje a zařízení.....	31
4.6.4 Postup laboratorního měření.....	32
4.6.5 Nastavené parametry.....	32
4.6.6 Naměřené hodnoty.....	33
4.6.7 Grafy.....	34
4.6.8 Závěr.....	35
4.7 Stereo regulátor hlasitosti.....	6
4.7.1 Zadání měření.....	36
4.7.2 Schéma zapojení .....	36

4.7.3	Použité přístroje a zařízení.....	37
4.7.4	Postup laboratorního měření.....	37
4.7.5	Nastavené parametry.....	38
4.7.6	Naměřené hodnoty.....	38
4.7.7	Výpočty.....	38
4.7.8	Graf.....	39
4.7.9	Výstup z osciloskopu.....	39
4.7.10	Závěr.....	40
5	Závěr.....	41
6	Použitá literatura.....	42

# 1 Úvod

V dnešní době, kdy je kladen důraz na realizaci co nejmenších součástek v elektronických obvodech, nejlépe ve formě monolitu na jednom čipu, aby bylo dosaženo vysokého výkonu za nízkou cenu a zároveň, aby byly součástky velmi malé o nízké hmotnosti. Pro návrh analogových odvodů se ukázalo jako nejlepší využití jejich aktivních RC obvodů. Aktivní RC obvody se obvykle realizují pomocí hybridních IC technologií a z RC tlusté nebo tenké vrstvé součástky. S transkonduktančním zesilovačem lze realizovat různé násobičky, napětím řízené zesilovače, oscilátory a nebo různé filtry. V bakalářské práci se seznámíme s obecnými pravidly operačního transkonduktančního zesilovače, ukážeme si některé jeho aplikace, které teoreticky popíšeme a poté na nich prakticky provedeme měření.

## 2 Transkonduktanční zesilovač

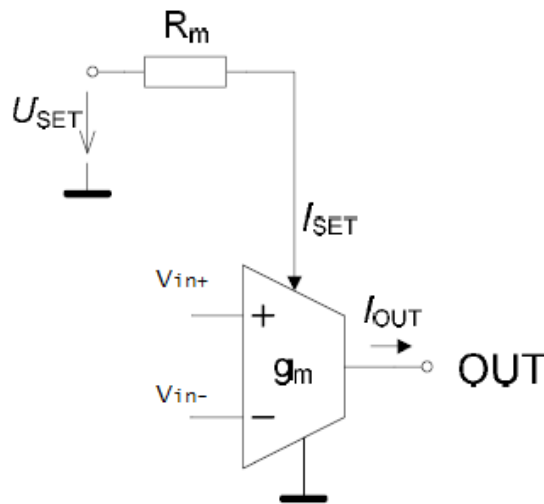
### 2.1 Princip fungování OTA

Operační transkonduktanční zesilovač, který se označuje OTA (Operational Transconductance Amplifier) je moderní aktivní prvek chovající se v ideálním případě jako napětím řízený zdroj proudu ( $V_{cc}$ ). Ideální převodová charakteristika je ukázána na rovnici (2.1).

$$I_{OUT} = g_m(V_{In+} - V_{In-}) \quad (2.1)$$

$V_{in+}$  nám značí neinvertující napětí vstupu,  $V_{in-}$  znázorňuje vstup invertujícího napětí a  $g_m$  je transkonduktance zesilovače [S, A/V]. U obvykle dostupných transkonduktančních zesilovačů je transkonduktance v rozmezí jednotek  $\mu S$  (Siemens) až desítek mS. Vstupní a výstupní impedance zesilovače je vysoká v ideálním případě by měla být nekonečná. Běžně se v praxi vstupní impedance vyskytuje v desítkách k $\Omega$  až desítky M $\Omega$ . Výstupní impedance u zesilovače dosahuje od několika stovek k $\Omega$  až po stovky M $\Omega$ . Parazitní kapacita, která je na vstupu a výstupu se pohybuje v rozmezí jednotek pF.

Transkonduktanci  $g_m$  se u některých typů OTA dá nastavovat elektronicky pomocí biasovacího proudu, který se značí  $I_{bias}$ . Můžeme se také setkat se značením  $I_{SET}$ ,  $I_{ABC}$  atd. Biasovací proud, nebo-li řídicí proud OTA se pohybuje v rozmezí jednotek  $\mu A$  až do jednotek mA. Řízení pomocí biasovacího proudu je nepraktické, a proto se většinou nahrazuje napěťovým zdrojem. Pro některé typy transkonduktančních zesilovačů je toto nutností. Lineární rozsah vstupních napětí je celkem omezený. Jsou také typy OTA, které tyto opatření nepotřebují a zpracují vstupní napětí o nízkých jednotkách voltů bez limitace, nebo jiného zkreslení. Nastává u nich jiný problém. Mívají menší vstupní a výstupní impedanci. Řízení transkonduktance  $g_m$  pomocí napětí je ukázáno na obrázku 2.1. [1] [2] [5] [7]



Obrázek 2.1: Řízení transkonduktance pomocí napětí

## 2.2 Neideální vlastnosti OTA

Stejně jako u standardních operačních zesilovačů jsou také neideální vlastnosti u reálných transkonduktančních zesilovačů. Vstupní fáze nelinearity je při vyšších vstupních napětích díky některým vlastnostem také vstupní fáze tranzistorů. V prvních zařízeních, jako je například transkonduktanční zesilovač typu CA 3080 vstupní fáze se skládala ze dvou bipolárních tranzistorů zapojených jako diferenciální zesilovač. Převodní charakteristiky zapojení jsou zhruba lineární pro vstup napětí o velikosti 20 mV a méně. Toto je závažné omezení, když je transkonduktanční zesilovač řízen otevřenou smyčkou, protože zde není žádná negativní zpětná vazba k linearizaci výstupu. Další nevýhodou je teplotní citlivost transkonduktance. [1] [3]

Transkonduktanční zesilovače můžeme rozdělit do dvou tříd:

- Bipolární OTA
- MOS OTA.

## 2.3 Bipolární OTA

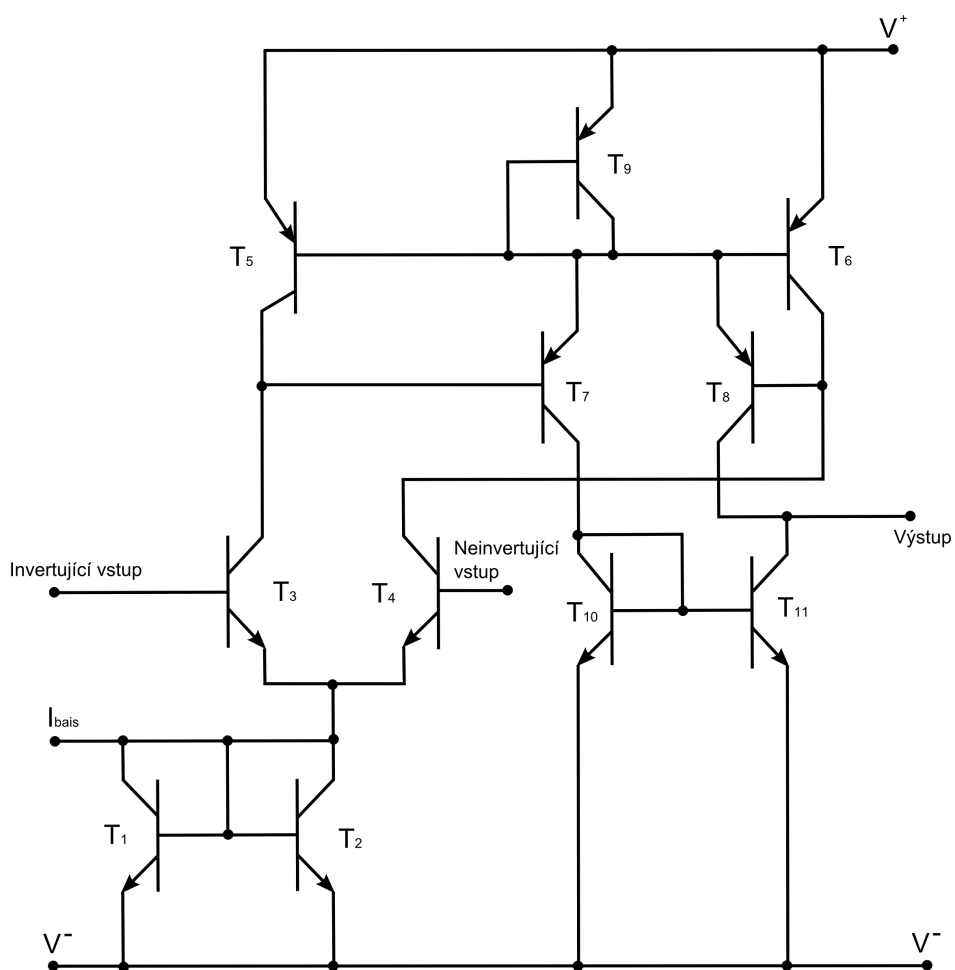
Bipolární OTA jsou komerčně k dispozici jako standardní čipy od různých výrobců integrovaných obvodů. Mohou být vyrobeny jako zařízení s jedním OTA zesilovačem na čipu (LM3080 a CA3080), nebo také jako dva transkonduktanční zesilovače na čipu (LM13600 a CA3280) a také jako tři OTA na čipu (CA3060). Vylepšený výkon OTA s vyrovnávacími buffery a linerizačními diodami na čipu, jsou dostupné jako LM 13600, LM 13700. Vyrovnávací buffery jsou vhodné pro realizaci DVCVS. Linearizační diody pomáhají rozšířit dynamický rozsah přístroje. Výpočet transkonduktance  $g_m$  je uvedený na rovnici (2.2) nebo ho lze také vypočítat pomocí rovnice (2.3) při pokojové teplotě 28°C. [1] [2] [6]

$$g_m = \frac{I_{ABC}}{2 V_T} \quad (2.2)$$

$$g_m = 19.23 I_{ABC} \quad (2.3)$$

### 2.3.1 Základní obvod bipolárního OTA

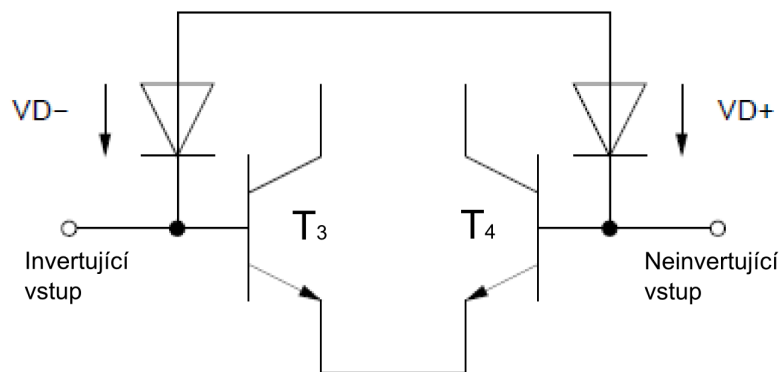
Základní obvod bipolárního transkonduktančního zesilovače je ukázán na obrázku č.2. Tranzistor  $T_3$  a  $T_4$  funguje jako vstupní zesilovač ovlivněný konstantním zdrojem proudu zahrnující  $T_1$  a  $T_2$  podle pořadí. Rozdílové proudy jsou výstupním signálem z  $T_3$  a  $T_4$  zase umocněné  $T_7$  a  $T_9$ , které fungují jako diferenciální zesilovač. Tranzistory  $T_{10}$  a  $T_{11}$  přeměňuje oboustranný výstup  $T_5$  prostřednictvím  $T_9$  do jednostranného výstupu. Všechny tranzistory pracují ve třídě A. Je třeba si uvědomit, že klidová úroveň proudu zesilovače slouží k vytváření klidového proud pro všechny tranzistory v přístroji. Signál není třeba uzemňovat, protože vstupní signál je diferenciální a výstup je zdroj proudu. [1] [2]



Obrázek 2.2: Základní obvod bipolárního OTA

### 2.3.2 Zapojení s linearizačními diodami

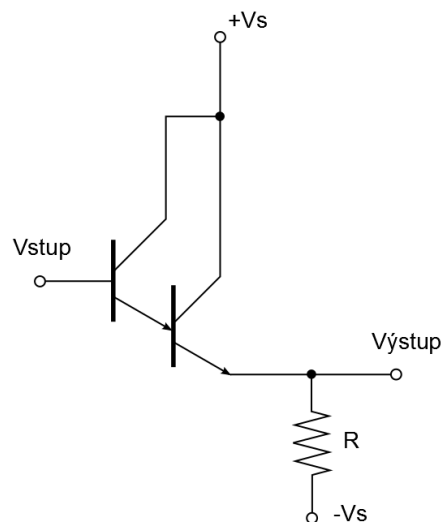
Pro vstupní napětí větší než je několik mV (20 mV a více) narůstá nelinearita transkonduktance. Abychom zachovali dobrou linearitu transkonduktance, přidáváme do zapojení transkonduktančního zesilovače linearizační diody. Toto vylepšení upraví přenosovou charakteristiku zařízení. Použitím linearizačních diod vede také ke snížení zkreslení. Zjednodušené schéma zapojení linearizačních diod je na obrázku 2.3. [2] [6]



Obrázek 2.3: Zapojení s linearizačními diodami

### 2.3.3 Zapojení oddělovacího zesilovače (vyrovnávací nárazník)

Vrchní hranice transkonduktance  $g_m$  je dána maximální velikostí řídicího proudu  $I_{ABC}$ . Pro nízké řídicí proudy je nutnost přidat do zapojení s transkonduktančním zesilovačem oddělovací zesilovač nebo-li také vyrovnávací nárazník (buffer) s velkou vstupní impedancí. Zde nám vyhovuje Darlingovo zapojení tranzistorů, které je ukázáno na obrázku 2.4. [1] [2] [4]



Obrázek 2.4: Zapojení oddělovacího zesilovače

## 2.4 MOS-OTA

V MOS transkonduktančních zesilovačích je transkonduktance  $g_m$  nastavitelná kontrolou napětí  $V_c$ . Jedná se o napětím ovládané zařízení. Operační zesilovače musí mít konstantní zisk pásma přes společné vstupní napětí (to odpovídá konstantní vstupní fázi). [1]

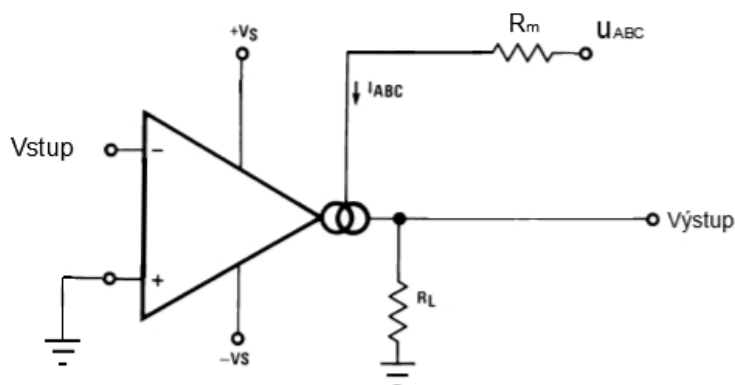


### 3 Aplikace OTA

Operační transkonduktanční zesilovač nám umožňuje jakousi programovatelnost většiny aplikací s ním spojenou. OTA zesilovače běžně pracují do 2MHz bez zpětné vazby, díky své jednoduchosti. Proudový výstup nám zde zjednodušuje impedanční přizpůsobivost, jelikož zátěž zesilovače je zároveň také výstupní impedancí. Lze pomocí OTA realizovat nejrůznější filtry, oscilátory, napětím řízené zesilovače nebo násobičky. Pro naše měření jsme si zvolili sedm druhů aplikací spojených s operačním transkonduktančním zesilovačem. Aplikace, které proměříme jsou Napět'ový zesilovač, Integrátor, Dolní propust 1.řádu, Analogová násobička, Analogová násobička s měnícím se řídicím proudem, Vliv diod v zesilovači a poslední aplikací, kterou jsme využili k měření je Stereo regulátor hlasitosti. [1] [4] [6]

#### 3.1 Napět'ový zesilovač

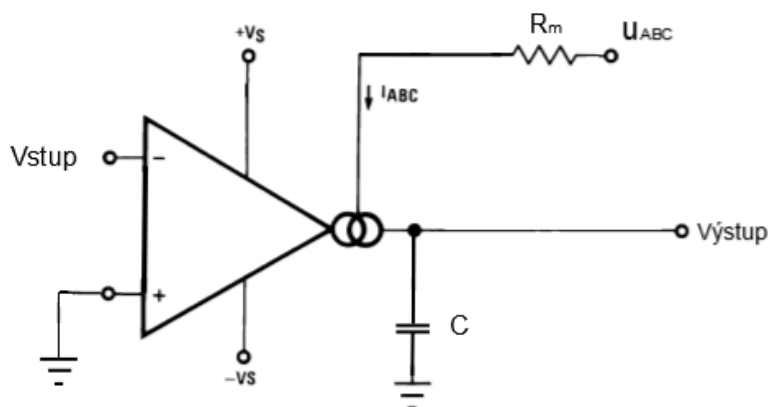
Napět'ový zesilovač je jedno ze základních zapojení s transkonduktančním zesilovačem. Samotné zapojení je realizováno tak, že na výstup transkonduktančního zesilovače je připojen paralelně odpor, který má druhý konec uzemněn. Základní schéma zapojení je znázorněno na obrázku 3.1. Zapojení napět'ového zesilovače se samostatně většinou moc často nenajde. Bývá většinou součástí nějakého většího zapojení. [1]



Obrázek 3.1: Základní zapojení napět'ového zesilovače

### 3.2 Integrátor

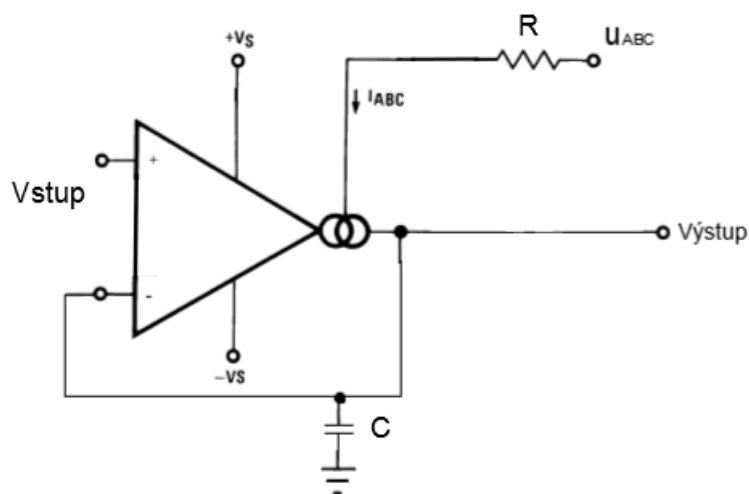
Integrátor je jedním ze základních zapojení s transkonduktančním zesilovačem. Samotné zapojení je realizováno tak, že na výstup transkonduktančního zesilovače je připojen paralelně kondenzátor, který je přiveden druhým koncem na zem. Integrátor nám provádí matematickou funkci integrování. Základní schéma zapojení je znázorněno na obrázku 3.2. [1] [8]



Obrázek 3.2: Základní zapojení proudového zesilovače

### 3.3 Dolní propust 1. řádu

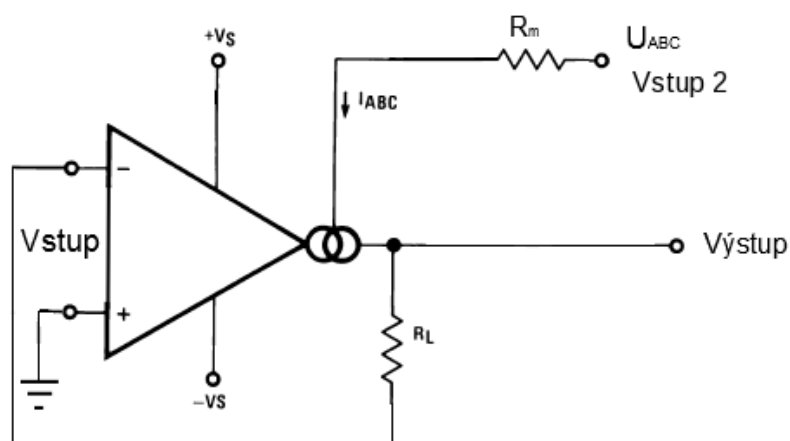
Dolní propust 1. řádu je v našem případě napěťový integrátor, který využíváme jako filtr. Dolní propust propouští frekvence o nízkém kmitočtu. Změnou řídicího proudu  $I_{ABC}$  se mění frekvenční rozsah dolní propusti. Zvyšováním řídicího proudu  $I_{ABC}$  nám také roste zlomový kmitočet. Zlomový kmitočet nastává ve chvíli, kdy napětí na výstupu klesne o 3 dB. Dolní propust 1. řádu s využitím operačního transkonduktančního zesilovače se využívá v zařízeních, kde není stálé nastavení velikosti dolní propusti. Použití tohoto filtru může být například v audio technice. Základní schéma dolní propusti je znázorněno na obrázku číslo 3.3. [1] [9]



Obrázek 3.3: Základní zapojení napěťového integrátoru

### 3.4 Analogová násobička

Analogová násobička je obvod tvořený transkonduktančním zesilovačem a odporem, který je připojen sériově na invertující vstup transkonduktančního zesilovače a druhým koncem je paralelně připojen na výstup. Na analogovou násobičku jsou nejčastěji přiváděny dva signály, které se poté společně násobí. V našem případě přivádíme signál z generátoru na invertující vstup transkonduktančního zesilovače a druhý signál je přijímán z řídicího proudu  $I_{ABC}$ . Základní schéma analogové násobičky je zobrazeno na obrázku číslo 3.4. [10]



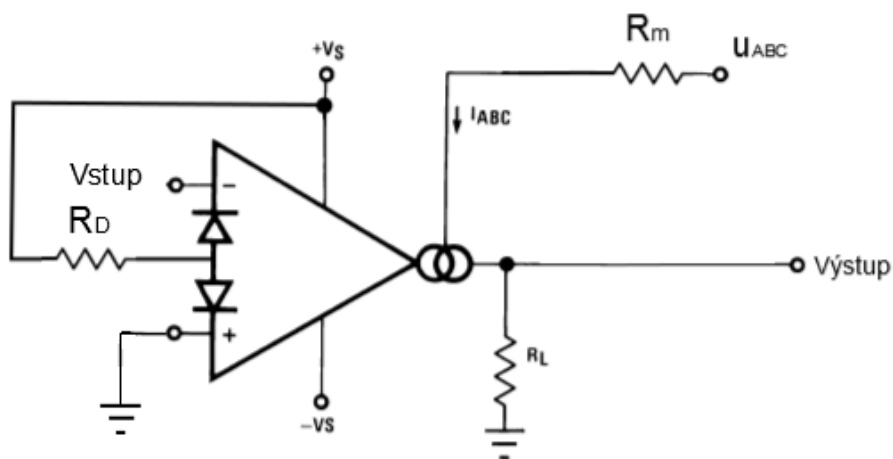
Obrázek 3.4: Základní zapojení analogové násobičky

### 3.5 Analogová násobička s měnicím se $I_{ABC}$

Analogová násobička s měnicím se řídicím proudem  $I_{ABC}$  je obvod tvořený transkonduktančním zesilovačem a odporem, který je připojen sériově na invertující vstup transkonduktančního zesilovače a druhým koncem je připojen na výstup. Na analogovou násobičku jsou nejčastěji přiváděny dva signály, které se po poté společně násobí. V našem případě přivádíme signál z generátoru na invertující vstup transkonduktančního zesilovače a druhý signál je přiveden z druhého generátoru na řídicí proud  $I_{ABC}$ . Řídicí proud nikdy v našem případě nepůjde do záporných hodnot, protože je podložený klidovou konstantou, nebo-li klidovým proudem. Základní schéma analogové násobičky je zobrazeno na obrázku číslo 3.4. [10]

### 3.6 Napěťový zesilovač s linearizačními diodami

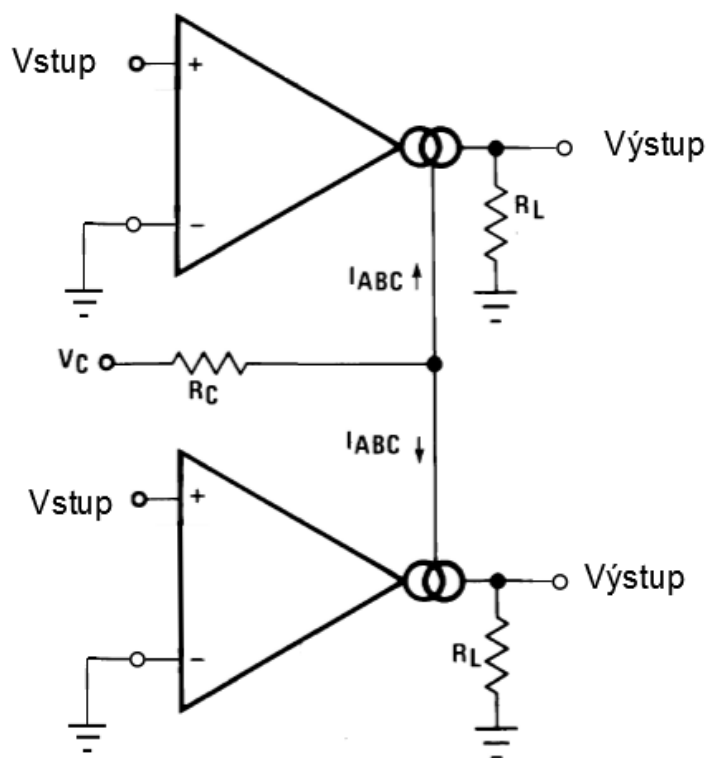
Napěťový zesilovač jsme již popisovali v kapitole[3.1]. Jediný rozdíl od předchozího popisu je, že jsme v transkonduktančním zesilovači využili linearizační diody. Abychom zachovali lepší převodní charakteristiku a linearitu zařízení, přidáváme do zapojení linearizační diody, které také slouží ke snížení šumu. Základní schéma napěťového zesilovače s linearizačními diodami je zobrazeno na obrázku 3.5. [1] [4]



Obrázek 3.5: Základní zapojení napěťového zesilovače s linearizačními diodami

### 3.7 Stereo regulátor hlasitosti

Stereo regulátor hlasitosti je aplikace, ve které jsou zapojeny dva transkonduktanční zesilovače. Každý transkonduktanční zesilovač je zapojen samostatně jako napěťový zesilovač. To znamená, že na výstup zesilovače je paralelně připojen odpor. Na neinvertující vstup každého transkonduktančního zesilovače přivádíme samostatný signál. Společně mají propojenou pouze transkonduktanci, pomocí které ovládají velikost řídicího proudu  $I_{ABC}$ . Když na oba neinvertující vstupy transkonduktančního zesilovače přivedeme stejné signály a pomocí jednoho řídicího proudu  $I_{ABC}$  ovládáme obě transkonduktance, tak na výstupu budou poté shodné signály z obou zesilovačů. Základní schéma stereo regulátoru hlasitosti je zobrazeno na obrázku číslo 3.7. [4]



Obrázek 3.6: Základní zapojení stereo regulátoru hlasitosti

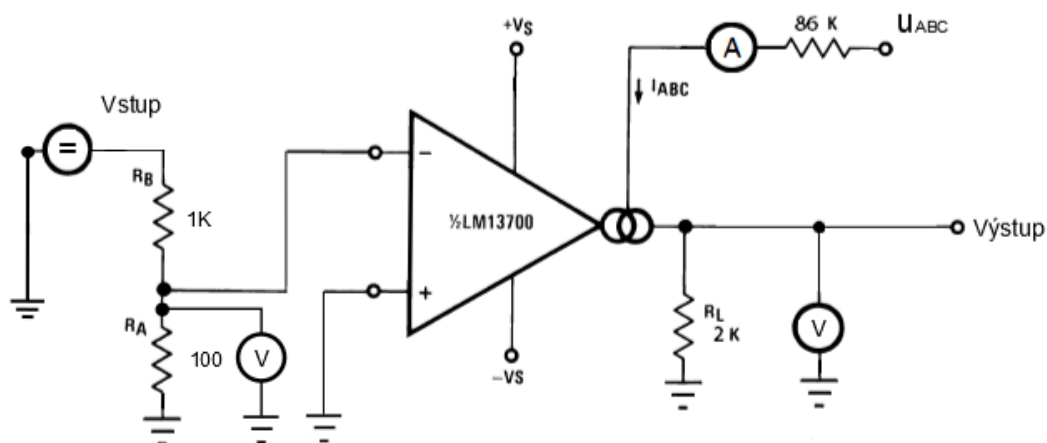
## 4 Praktická část – Měření aplikací OTA

### 4.1 Napěťový zesilovač

#### 4.1.1 Zadání měření

Vyzkoušet si práci s transkonduktančním zesilovačem. Zapojit a odměřit aplikaci napěťový zesilovač, ze které poté vypracovat protokol.

#### 4.1.2 Schéma zapojení



Obrázek 4.1: Schéma zapojení napěťového zesilovače

#### 4.1.3 Použité přístroje a zařízení

- 2x Zdroj
- 3x Multimetr Agilent U1241B
- Odporová dekáda R DECADE 2
- OTA – LM13700
- Stavebnice RC
- Odpor  $2\text{ k}\Omega$
- Odporový dělič:  $100\Omega + 1\text{ k}\Omega$  seriově zapojeno (poměr 1:10)

#### 4.1.4 Postup laboratorního měření

- příprava zařízení a součástek pro měření
- zapojení podle schématu
- nastavení zdroje na  $\pm 10$  V DC
- nastavení  $I_{ABC}$  na  $100 \mu\text{A}$
- nastavení napětového zdroje na minimum
- postupné zvyšování napětí na napětovém zdroji
- zaznamenání hodnot do tabulky

#### 4.1.5 Nastavené parametry

Tabulka 4.1: – Nastavené parametry

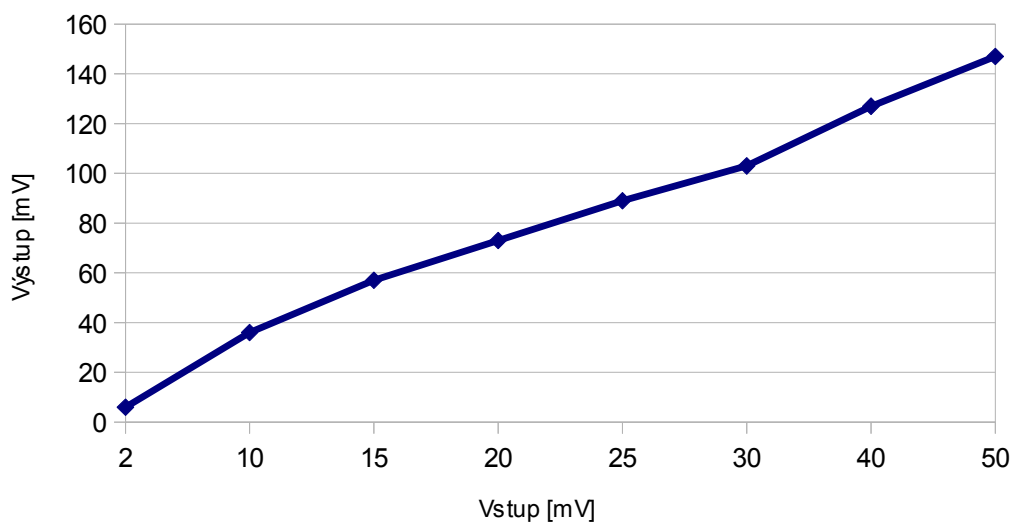
Napájecí napětí	$\pm 10$ V DC
$R_L$	2 k $\Omega$
$I_{ABC}$	100 $\mu\text{A}$

#### 4.1.6 Naměřené hodnoty

Tabulka 4.2: - Naměřené hodnoty

Vstup [mV]	Výstup [mV]
2	6
10	36
15	57
20	73
25	89
30	103
40	127
50	147

#### 4.1.7 Graf



Obrázek 4.2: Převodní charakteristika napětového zesilovače

#### 4.1.8 Vypočtené hodnoty

Výpočet řídicího proudu:

$$I_{ABC} = \frac{U_{ABC}}{R_{ABC}} = \frac{8,6}{86000} = 100 \mu A \quad (4.1)$$

Výpočet napětového přenosu:

$$K_U = g_m R_L = (19,23 I_{ABC}) R_L = 19,23 * (100^{-6}) * 2000 = 3,846^{-8} \quad (4.2)$$

#### 4.1.9 Závěr

Byl zapojen a změřen napětový zesilovač, jedno ze základních zapojení s použitím operačního transkonduktančního zesilovače. Provedlo se měření o osmi hodnotách, které byly zapsány do tabulky a poté zaznamenány do grafu, ze kterého je patrná převodní charakteristika napětového zesilovače.

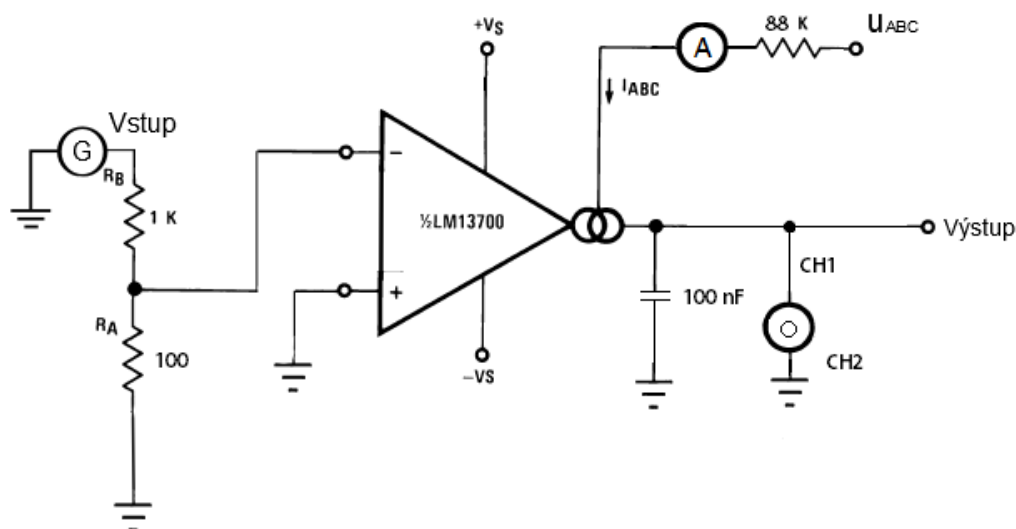


## 4.2 Integrátor

### 4.2.1 Zadání měření

Vyzkoušet si práci s transkonduktančním zesilovačem. Zapojit a odměřit aplikace integrátor, ze které poté vypracovat protokol.

### 4.2.2 Schéma zapojení



Obrázek 4.3: Schéma zapojení integrátoru

### 4.2.3 Použité přístroje a zařízení

- Zdroj
- Multimetr Agilent U1241B
- Odporová dekáda R DECADE 2
- Kondenzátor  $100\text{ nF}$
- OTA – LM13700
- Stavebnice RC
- Generátor Agilent 33210A
- Osciloskop Taktronix TDS 1002B
- Odporový dělič:  $100\text{ }\Omega + 1\text{ k}\Omega$  seriově zapojeno (poměr 1:10)

#### 4.2.4 Postup laboratorního měření

- příprava zařízení a součástek pro měření
- zapojení podle schématu
- nastavení generátoru na 20 mV 1 kHz (Obdélníkový signál)
- nastavení  $I_{ABC}$  na 100  $\mu\text{A}$
- výstup z osciloskopu uložit ve formě JPG na flash disc

#### 4.2.5 Nastavené parametry

Tabulka 4.3: - Nastavené parametry

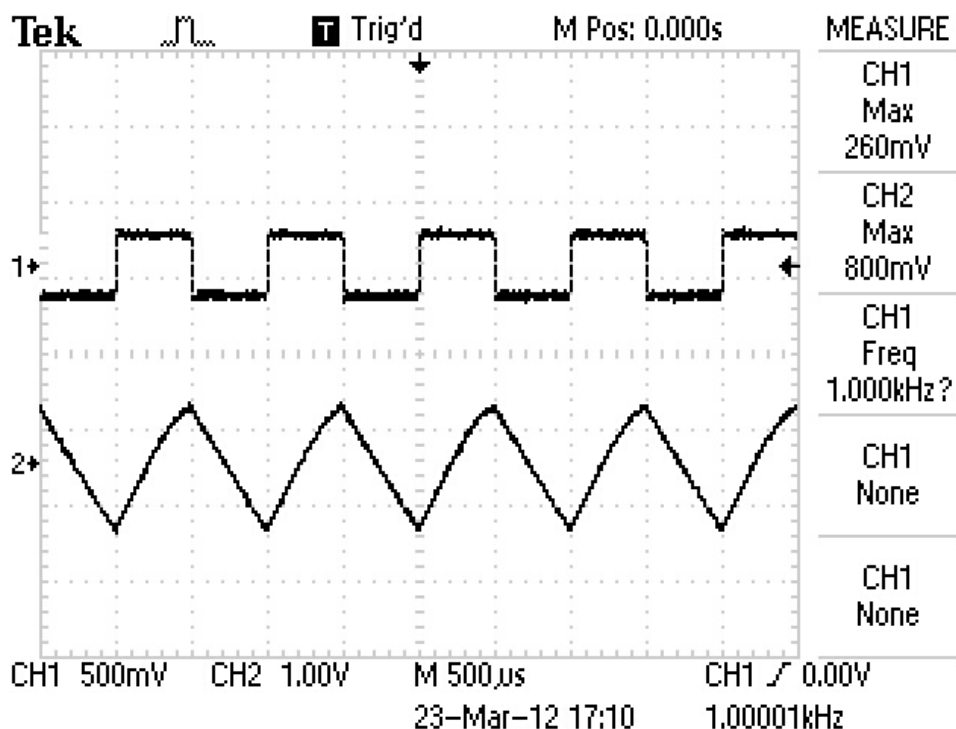
<b>Vstupní napětí:</b>	20 mV 1 kHz AC (Obdélníkový signál)
<b>C:</b>	100 nF
<b><math>I_{ABC}</math></b>	100 $\mu\text{A}$
<b>Ch1</b>	Výstup
<b>Ch2</b>	Vstup

#### 4.2.6 Výpočet

Výpočet napěťového přenosu :

$$K_U = \frac{g_m}{pC} = \frac{19,23 I_{ABC}}{j \omega C} \quad (4.3)$$

#### 4.2.7 Výstup z osciloskopu



Obrázek 4.4: Výstup z osciloskopu

#### 4.2.8 Závěr

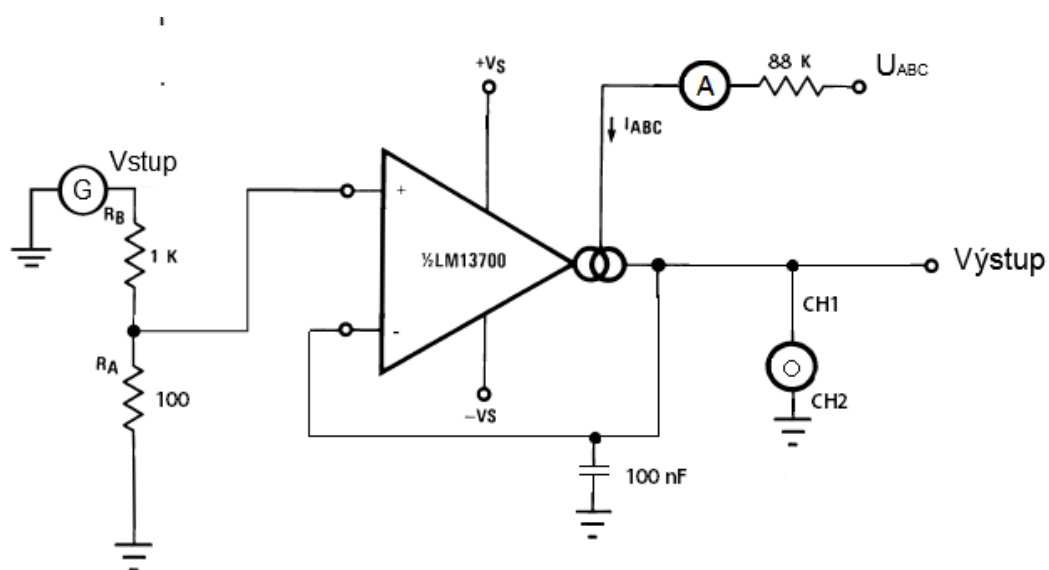
V aplikaci integrátor s použitím transkonduktančního zesilovače se kondenzátor, který je připojen paralelně na výstup se při kladné hodnotě signálu na vstupu zesilovače kondenzátor nabíjí a při blížení se nulové hodnotě signálu na vstupu zesilovače se kondenzátor vybíjí. Integrátor nám převádí funkci sinus na funkci kosinus, což znamená že nám posouvá fázi o  $90^\circ$ .

## 4.3 Dolní propust 1.řádu

### 4.3.1 Zadání měření

Vyzkoušet si práci s transkonduktančním zesilovačem. Zapojit a odměřit aplikaci dolní propust 1.řádu, ze které poté vypracovat protokol.

### 4.3.2 Schéma zapojení



Obrázek 4.5: Schéma zapojení dolní propusti 1.řádu

### 4.3.3 Použité přístroje a zařízení

- Zdroj
- Multimetr Agilent U1241B
- Odporová dekáda R DECADE 2
- OTA – LM13700
- Kondenzátor 100 nF
- Stavebnice RC
- Generátor Agilent 33210A
- Osciloskop Taktronix TDS 1002B
- Odporový dělič:  $1\text{ k}\Omega + 100\text{ }\Omega$  seriově zapojeno (poměr 1:10)

#### 4.3.4 Postup laboratorního měření

- příprava zařízení a součástek pro měření
- zapojení podle schématu
- nastavení  $I_{ABC}$  na  $100\ \mu\text{A}$
- vypočítání velikost napětí na výstupu potřebného ke zlomové frekvenci
- proměření převodní charakteristiky pro řídicí proud  $100\ \mu\text{A}$
- nastavení generátoru na  $290\ \text{mV}$  (sinusový signál)
- na generátoru zvyšujeme kmitočet v rozmezí  $100\ \text{Hz}$  až  $25\ \text{kHz}$
- zaznamenáme si naměřené hodnoty
- nastavíme  $I_{ABC}$  na  $100\ \mu\text{A}$ ,  $120\ \mu\text{A}$ ,  $140\ \mu\text{A}$ ,  $158\ \mu\text{A}$ ,  $181\ \mu\text{A}$ ,  $202\ \mu\text{A}$ ,  $223\ \mu\text{A}$ ,  $241\ \mu\text{A}$ ,  $263\ \mu\text{A}$ ,  $280\ \mu\text{A}$
- u každého řídicího proudu si poznačíme hodnotu zlomové frekvence, kterou poté vyneseme do grafu

#### 4.3.5 Nastavené parametry

Tabulka 4.4: – Nastavené parametry

<b>Vstupní napětí:</b>	290 mV AC (sinusový signál)
<b>C:</b>	100 nF
<b><math>I_{ABC}</math>:</b>	100 $\mu\text{A}$ , 120 $\mu\text{A}$ , 140 $\mu\text{A}$ , 158 $\mu\text{A}$ , 181 $\mu\text{A}$ , 202 $\mu\text{A}$ , 223 $\mu\text{A}$ , 241 $\mu\text{A}$ , 263 $\mu\text{A}$ , 280 $\mu\text{A}$

### 4.3.6 Naměřené hodnoty

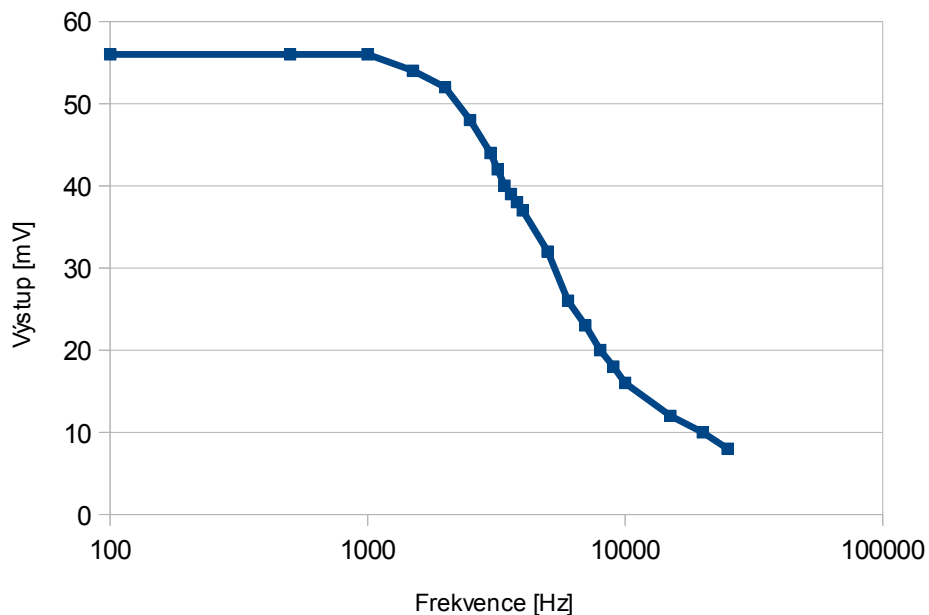
Tabulka 4.5: – Pro řídicí proud  $100\ \mu A$

Frekvence [Hz]	Výstup [mV]
100	56
500	56
1k	56
1,5k	54
2k	52
2,5k	48
3k	44
3,2k	42
<b>3,4k</b>	<b>40</b>
3,6k	39
3,8k	38
4k	37
5k	32
6k	26
7k	23
8k	20
9k	18
10k	16
15k	12
20k	10
25k	8

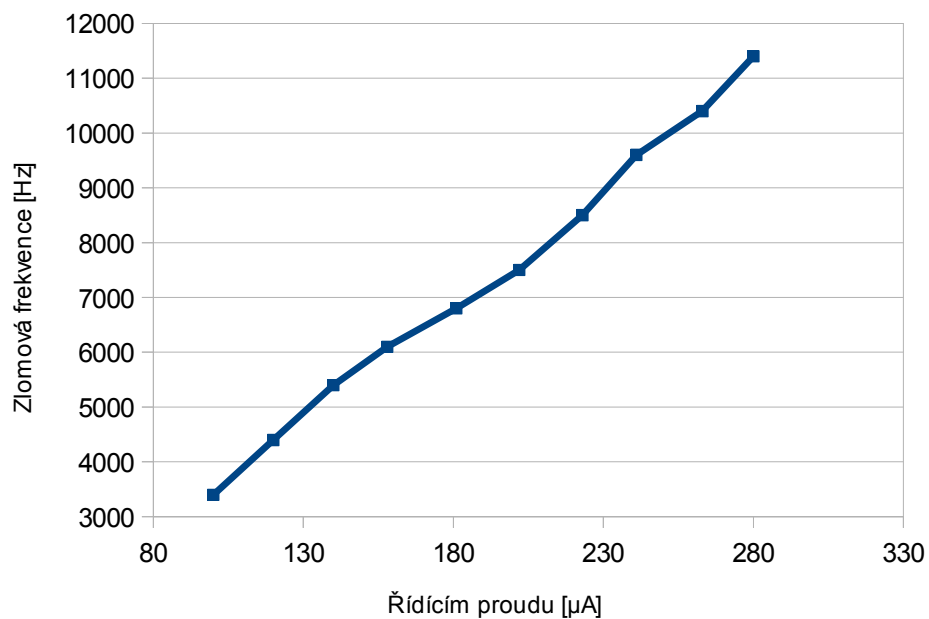
Tabulka 4.6: – Závislost zlomové frekvence na řídicím proudu  $I_{ABC}$

Řídicí proud $I_{ABC}$ [ $\mu A$ ]	Zlomová frekvence [kHz]
100	3,4
120	4,4
140	5,4
158	6,1
181	6,8
202	7,5
223	8,5
241	9,6
263	10,4
280	11,4

#### 4.3.7 Grafy



Obrázek 4.6: Převodní charakteristika dolní propusti při řídicím proudu  $100 \mu A$



Obrázek 4.7: Závislost zlomového kmitočtu na řídicím proudu  $I_{ABC}$

#### 4.3.8 Výpočet

Výpočet napětí při zlomové frekvenci:

$$U_c = \frac{U_{max}}{\sqrt{2}} = \frac{56mV}{\sqrt{2}} = 39,6mV \quad (4.4)$$

Výpočet napěťového přenosu:

$$K_U = \frac{g_m}{pC + g_m} = \frac{19,23 I_{ABC}}{j \omega C + 19,23 I_{ABC}} \quad (4.5)$$



#### 4.3.9 Závěr

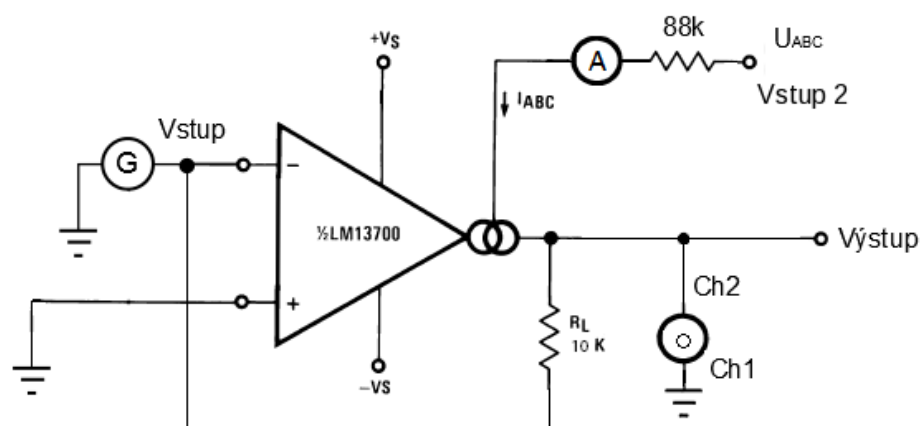
Byla zapojena a změřena aplikace dolní propust 1.řádu s použitím operačního transkonduktančního zesilovače. Již jak bylo zmíněno v teorii, dolní propust propouští nízké frekvence, což bylo potvrzeno i při měření. Změnou řídicího proudu  $I_{ABC}$  se mění také zlomový kmitočet dolní propusti. Zvyšováním řídicího proudu  $I_{ABC}$  se zvyšovala také zlomová frekvence. Provedli jsme měření s řídicím proudem  $I_{ABC}$  o velikosti  $100\ \mu\text{A}$  a nastaveném napětí  $290\ \text{mV}$  na generátoru ve frekvenčním rozsahu měření  $100\ \text{Hz}$  až  $25\ \text{kHz}$ . Při druhém měření byl generátor nastaven na  $100\ \text{mV}$  a byly zaznamenány zlomové frekvence při deseti různých řídicích proudech  $I_{ABC}$ .

## 4.4 Analogová násobička

### 4.4.1 Zadání měření

Vyzkoušet si práci s transkonduktančním zesilovačem. Zapojit a odměřit aplikaci analogová násobička, ze které poté vypracovat protokol.

### 4.4.2 Schéma zapojení



Obrázek 4.8: Schéma zapojení analogové násobičky

### 4.4.3 Použité přístroje a zařízení

- Zdroj
- Multimetr Agilent U1241B
- Odporová dekáda R DECADE 2
- OTA – LM13700
- Stavebnice RC
- Generátor Agilent 33210A
- Osciloskop Taktronix TDS 1002B
- Odpor 10 k $\Omega$

#### 4.4.4 Postup laboratorního měření

- příprava zařízení a součástek pro měření
- zapojení podle schématu
- nastavení  $I_{ABC}$  na 100  $\mu\text{A}$  (stejnosměrný signál)
- nastavení na generátoru napětí na 44 mV a frekvenci na 1 kHz
- výstup z osciloskopu uložit ve formě JPG na flash disc

#### 4.4.5 Nastavené parametry

Tabulka 4.7: – Nastavené parametry

Vstupní napětí:	44 mV 1 kHz AC
$R_L$ :	10 k $\Omega$
$I_{ABC}$ :	100 $\mu\text{A}$

#### 4.4.6 Výpočet

Výpočet celkového napětí:

$$U_z = 520 \text{ mV} \quad (4.3)$$

$$U_z = k * U_x * U_{ABC} = k * U_x * (I_{ABC} * R_m)$$

$$U_z = k * 0,044 * (0,000100 * 88000)$$

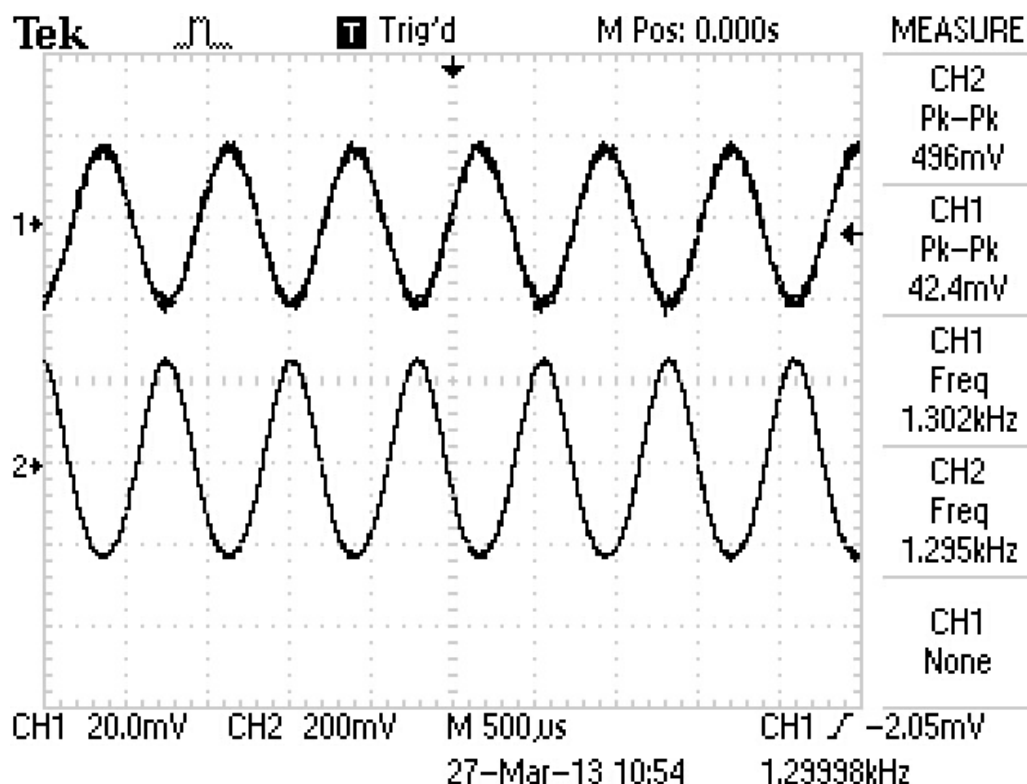
Výpočet konstanty:

$$k = \frac{U_z}{0,044 * (0,000100 * 88000)} \quad (4.4)$$

$$k = \frac{0,520}{0,044 * (0,000100 * 88000)}$$

$$k = 1,3577$$

#### 4.4.7 Výstup z osciloskopu



Obrázek 4.9: Vstupní a výstupní signál z analogové násobičky

#### 4.4.8 Závěr

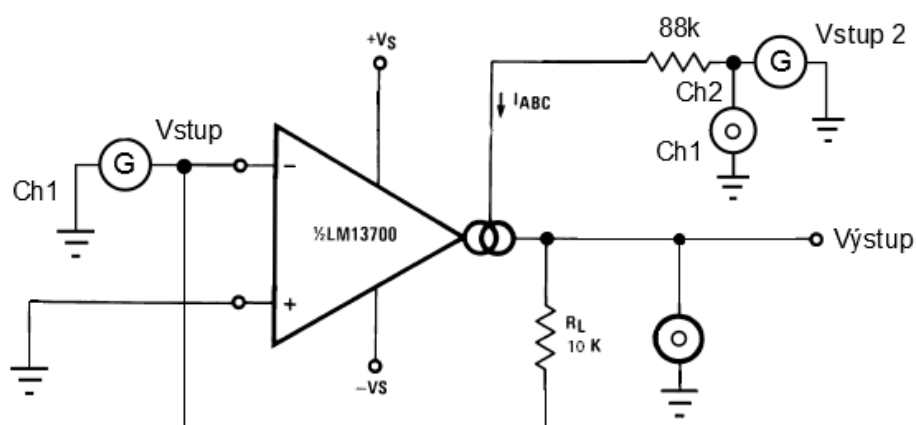
Byla zapojena a změřena aplikace analogová násobička s použitím operačního transkonduktančního zesilovače. Na invertující vstup transkonduktančního zesilovače byl přiveden sinusový signál z generátoru. Druhý stejnosměrný signál byl přijímán z řídicího proudu  $I_{ABC}$ . Dohromady se oba signály společně násobily s použitím konstanty  $k$ . Společné násobení signálu nám dává výsledný signál, což je signál o stejné periodě jako vstupní signál, ale přidáním druhého stejnosměrného signálu nám zapříčiní vzrůst amplitudy signálu.

## 4.5 Analogová násobička s měnicím se řídícím proudem $I_{ABC}$

### 4.5.1 Zadání měření

Vyzkoušet si práci s transkonduktančním zesilovačem. Zapojit a odměřit aplikaci napěťový zesilovač s měnicím se řídícím proudem  $I_{ABC}$ , ze které poté vypracovat protokol.

### 4.5.2 Schéma zapojení



Obrázek 4.10: Schéma zapojení napěťového zesilovače s měnicím se řídícím proudem  $I_{ABC}$

### 4.5.3 Použité přístroje a zařízení

- Zdroj
- Odporová dekáda R DECADE 2
- OTA – LM13700
- Stavebnice RC
- 2x Generátor Agilent 33210A
- 2x Osciloskop Taktronix TDS 1002B
- Odpor 10 k $\Omega$

#### 4.5.4 Postup laboratorního měření

- příprava zařízení a součástek pro měření
- zapojení podle schématu
- nastavení  $I_{ABC}$  na  $100\ \mu\text{A}$  (střídavý signál)
- nastavíme na prvním generátoru napětí  $10\ \text{mV}$  a frekvenci na  $10\ \text{Hz}$  a druhý generátor na napětí  $2\ \text{V}$  a frekvenci na  $100\ \text{Hz}$
- vstupní signály přicházející na osciloskop uložíme ve formě JPG na flash disc
- výstupní signál přicházející na osciloskopu uložíme ve formě JPG na flash disc

#### 4.5.5 Nastavené parametry

Tabulka 4.8: – Nastavené parametry

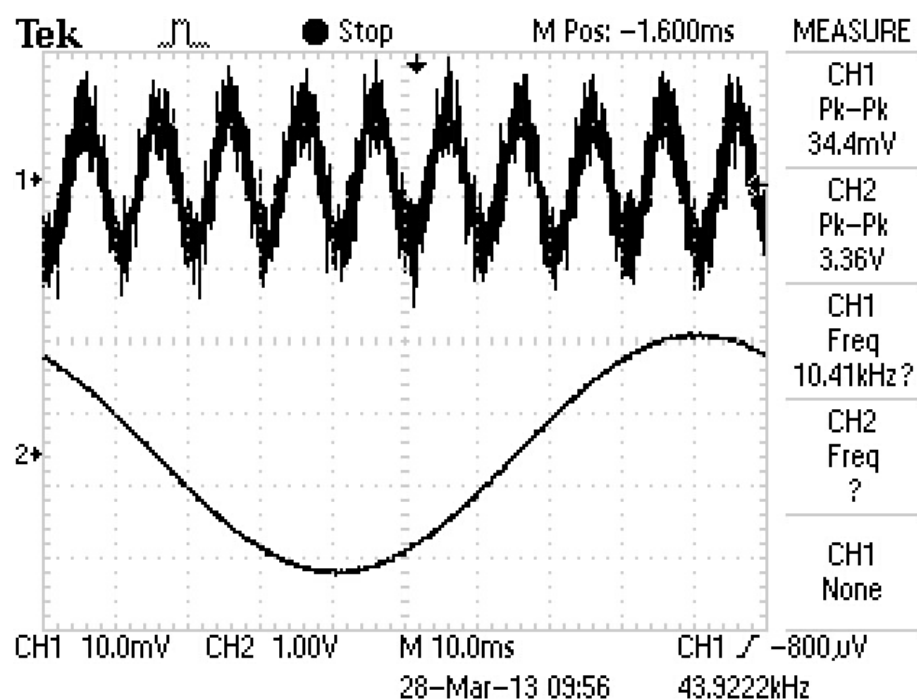
Vstupní napětí:	10 mV 10 Hz AC
Napětí na $I_{ABC}$ :	2 V 100 Hz AC
$R_L$ :	10 k $\Omega$

#### 4.5.6 Výpočet

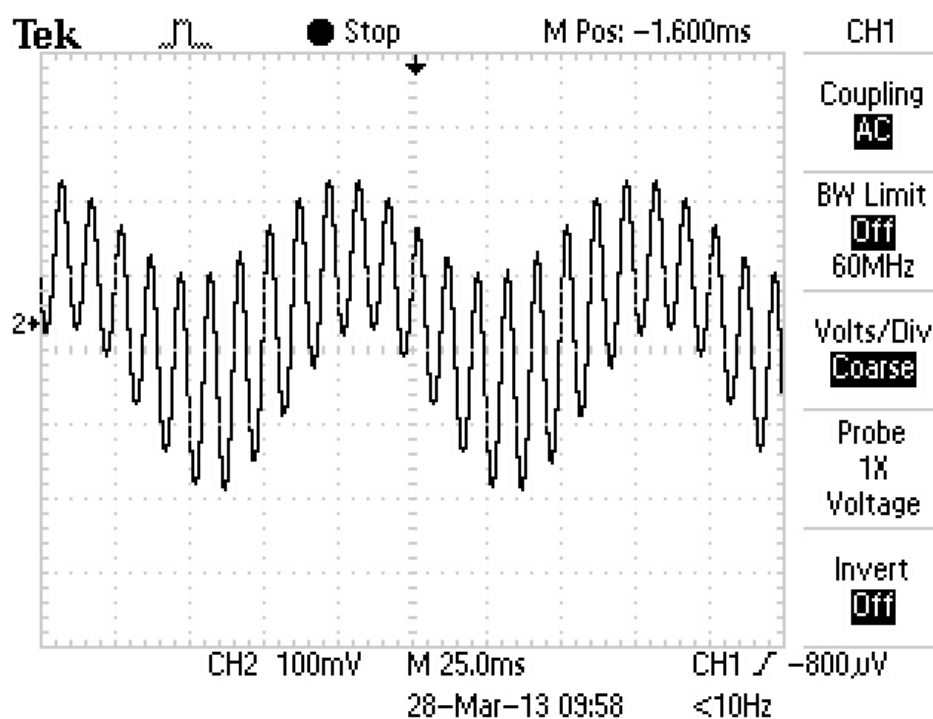
Výpočet napěťového přenosu:

$$K_U = g_m R_L = (19,23 I_{ABC}) R_L = 19,23 * (100^{-6}) * 10000 = 1,923^{-7} \quad (4.5)$$

#### 4.5.7 Výstup z osciloskopu



Obrázek 4.11: Vstupní signály



Obrázek 4.12: Výstupní signál z analogové násobičky s měnícím se řídícím proudem  $I_{ABC}$

#### 4.5.8 Závěr

Byla zapojena a změřena aplikace analogová násobička s měnícím se řídicím proudem  $I_{ABC}$  s použitím operačního transkonduktančního zesilovače. Na invertující vstup transkonduktančního zesilovače byl přiveden signál z generátoru. Druhý generátor posílal signál do transkonduktance. Na výstupu jsme dostali signál tvořený vynásobením dvou signálů, signálu na invertující vstup a signálu přijímaného z transkonduktance. Výstupní signál se poté chová jako signál modulovaný. Signál přijímaný z invertujícího vstupu se chová jako signál modulační a signál přijímaný z transkonduktance se chová jako signál nosný.

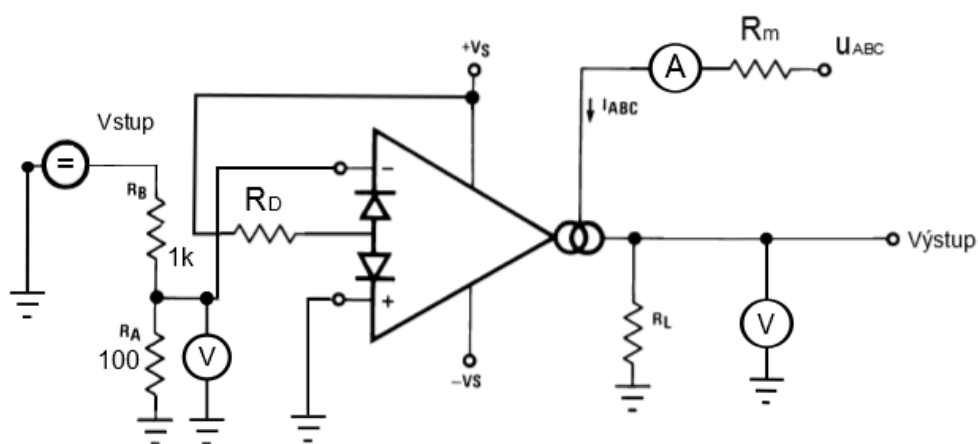


## 4.6 Napětový zesilovač si linearizačními diodami

### 4.6.1 Zadání měření

Vyzkoušet si práci s transkonduktančním zesilovačem. Zapojit a odměřit aplikaci napětový zesilovač s linearizačními diodami, ze které poté vypracovat protokol.

### 4.6.2 Schéma zapojení



Obrázek 4.13: Schéma zapojení napětového zesilovače si linearizačními diodami

### 4.6.3 Použité přístroje a zařízení

- 2x Odporová dekáda R DECADE 2
- 2x Zdroj
- 3x Multimetr Agilent U1241B
- OTA – LM13700
- Stavebnice RC
- Odpor 10 k $\Omega$

#### 4.6.4 Postup laboratorního měření

- příprava zařízení a součástek pro měření
- zapojení podle schématu
- nastavení vstupního napětí na 144 mV
- nastavení  $I_{ABC}$  na 100  $\mu\text{A}$
- nastavení napěťový zdroj na minimum
- postupné zvyšování napětí na napěťovém zdroji podle naší tabulky
- zaznamenávání hodnot
- poté do obvodu zapojíme linearizační diody
- nastavíme vstupní napětí na minimum
- postupné zvyšování napětí na napěťovém zdroji podle naší tabulky
- zaznamenávání hodnot

#### 4.6.5 Nastavené parametry

Tabulka 4.9:– Nastavené parametry

$R_m$ :	88 k $\Omega$
$R_D$ :	15 k $\Omega$
$R_L$ :	10 k $\Omega$
$I_{ABC}$ :	100 $\mu\text{A}$
$I_D$ :	617 $\mu\text{A}$

#### 4.6.6 Naměřené hodnoty

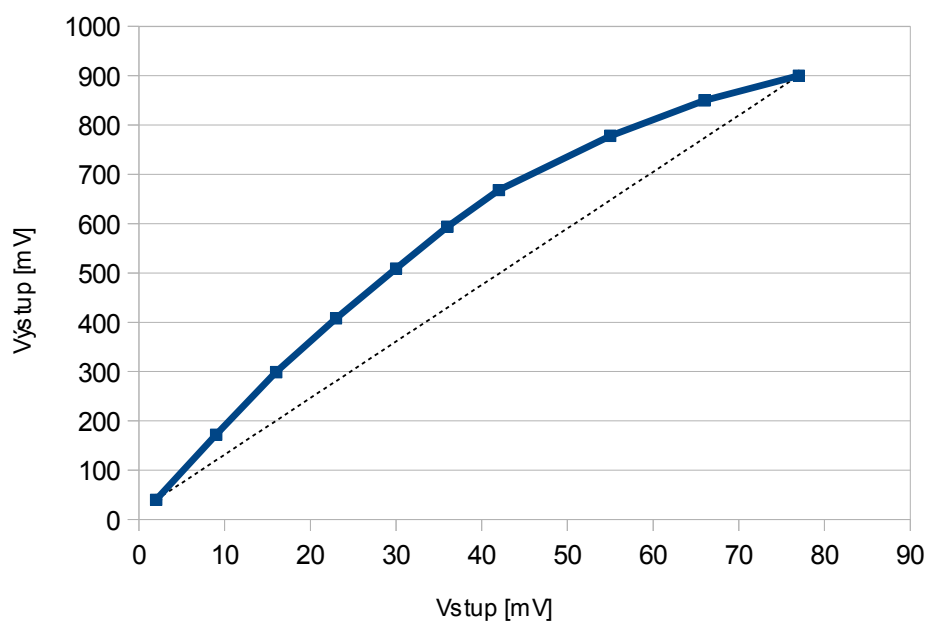
*Tabulka 4.10: – Naměřené hodnoty - zapojení bez linearizačních diod*

Vstup [mV]	Výstup [mV]
2	40
9	172
16	299
23	408
30	509
36	594
42	668
55	778
66	850
77	900

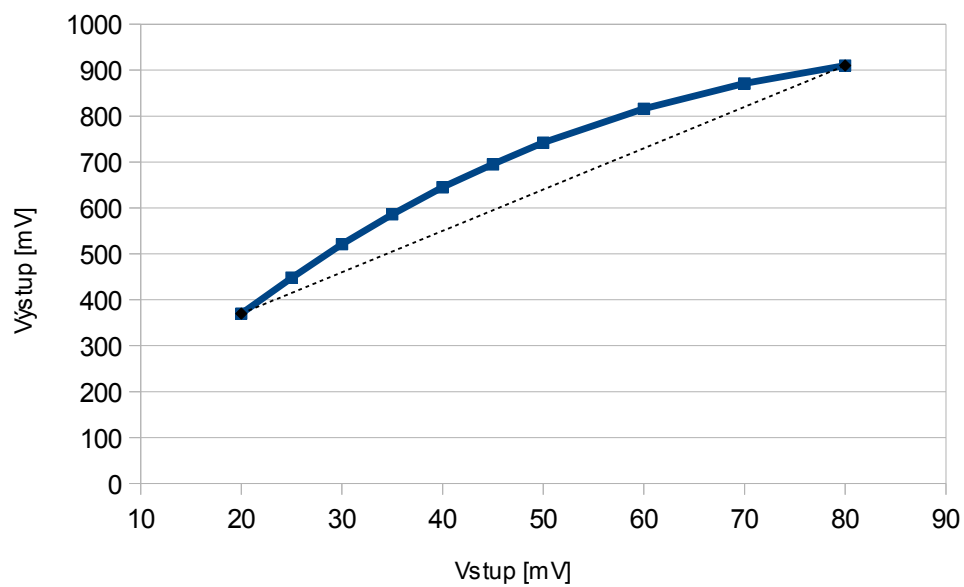
*Tabulka 4.11: – Naměřené hodnoty - zapojení s linearizačními diodami*

Vstup [mV]	Výstup [mV]
20	370
25	448
30	521
35	586
40	645
45	695
50	742
60	816
70	871
80	910

#### 4.6.7 Grafy



Obrázek 4.14: Převodní charakteristika bez zpojených linearizačních diod



Obrázek 4.15: Převodní charakteristika se zpojenými linearizačními diodami

#### 4.6.8 Závěr

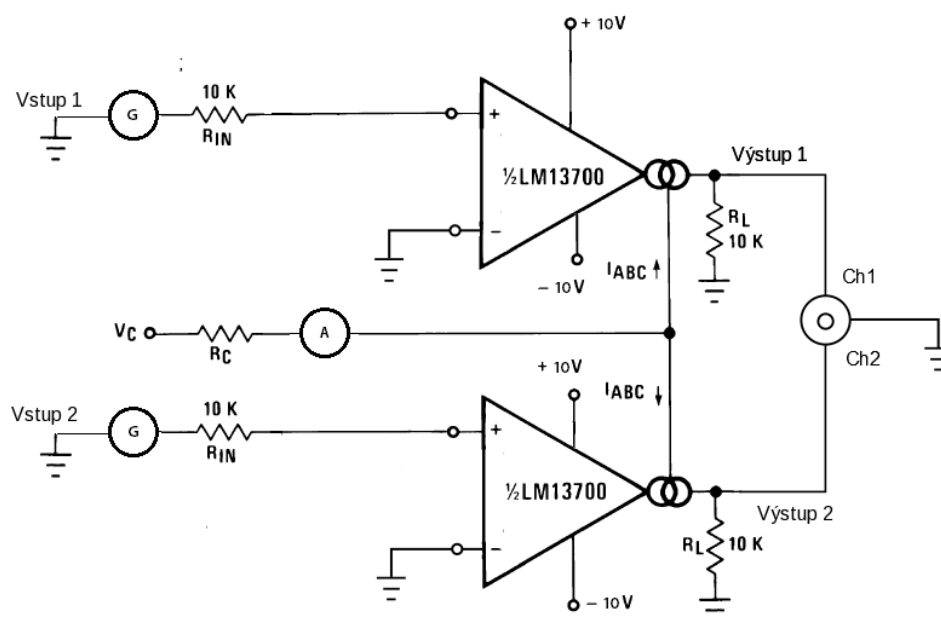
Byla zapojena a změřena aplikace napěťový zesilovač s linearizačními diodami s použitím operačního transkonduktančního zesilovače. Byly provedeny dvě měření, první měření bylo provedeno bez zapojení linearizačních diod a druhé měření bylo provedeno se zapojenými linearizačními diodami. Veškeré hodnoty byly zaznamenány do tabulek a poté z nich byly vytvořeny převodní charakteristiky, na kterých je patrné, že zapojení s linearizačními diodami mají více lineární převodní charakteristiku.

## 4.7 Stereo regulátor hlasitosti

### 4.7.1 Zadání měření

Vyzkoušet si práci s transkonduktančním zesilovačem. Zapojit a odměřit aplikaci stereo regulátor hlasitosti, ze které poté vypracovat protokol.

### 4.7.2 Schéma zapojení



Obrázek 4.16: Schéma zapojení stereo regulátor hlasitosti

### 4.7.3 Použité přístroje a zařízení

- Odporová dekáda R DECADE 2
- Zdroj
- 2x Generátor Agilent 33210A
- Multimetr Agilent U1241B
- OTA – LM13700
- Stavebnice RC
- Osciloskop Taktronix TDS 1002B
- Odpor ( $4 \times 10 \text{ k}\Omega$ )

### 4.7.4 Postup laboratorního měření

- příprava zařízení a součástek pro měření
- zapojení podle schématu
- nastavení vstupních napětí na obou generátorech 20 mV
- nastavení frekvencí na generátorech
- nastavení řídicích proudů  $I_{ABC}$
- zaznamenávání hodnot
- uložení výstupu na osciloskopu ve formě JPG na flash disc

#### 4.7.5 Nastavené parametry

Tabulka 4.12: – Nastavené parametry

<b>Řídící proud <math>I_{ABC}</math></b>	88 $\mu$ A, 98 $\mu$ A, 100 $\mu$ A, 110 $\mu$ A, 126 $\mu$ A, 146 $\mu$ A, 176 $\mu$ A, 219 $\mu$ A, 292 $\mu$ A,
<b>Vstup1:</b>	1 kHz / 2 kHz 20 mV sinusový signál
<b>Vstup2:</b>	1 kHz 20 mV AC sinusový signál
<b><math>R_L</math>:</b>	10 k $\Omega$
<b><math>R_{in}</math>:</b>	10 k $\Omega$

#### 4.7.6 Naměřené hodnoty

Tabulka 4.13: – Naměřené hodnoty – výstupní napětí v závislosti na řídícím proudu

<b>Řídící proud <math>I_{ABC}</math> [<math>\mu</math>A]</b>	<b>Výstup [mV]</b>
292 ( $R_m$ 30k $\Omega$ )	1100
219 ( $R_m$ 40k $\Omega$ )	820
176 ( $R_m$ 50k $\Omega$ )	680
146 ( $R_m$ 60k $\Omega$ )	560
126 ( $R_m$ 70k $\Omega$ )	500
110 ( $R_m$ 80k $\Omega$ )	440
100 ( $R_m$ 88k $\Omega$ )	400
98 ( $R_m$ 90k $\Omega$ )	400
88 ( $R_m$ 100k $\Omega$ )	360

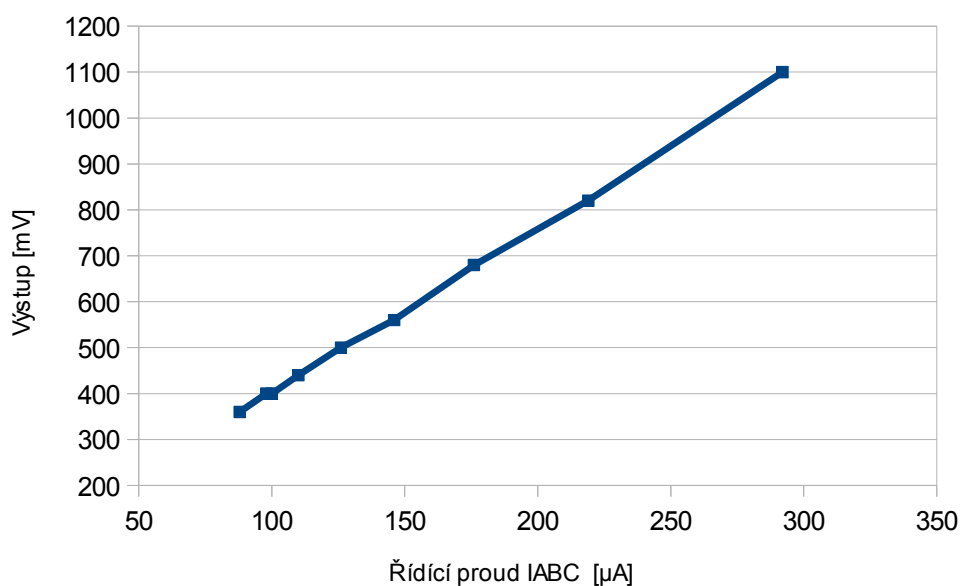
#### 4.7.7 Výpočty

Výpočet napěťového přenosu jednoho zesilovače:

$$K_U = g_m R_L = (19,23 I_{ABC}) R_L = 19,23 * (100^{-6}) * 10000 = 1,923^{-7} \quad (4.6)$$

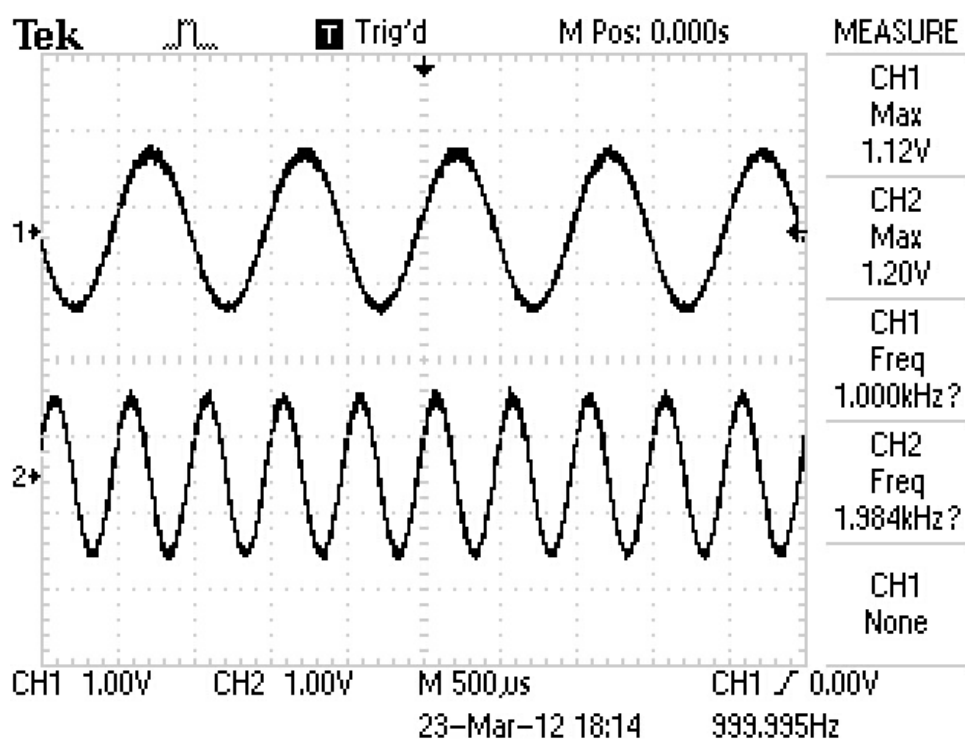


#### 4.7.8 Graf

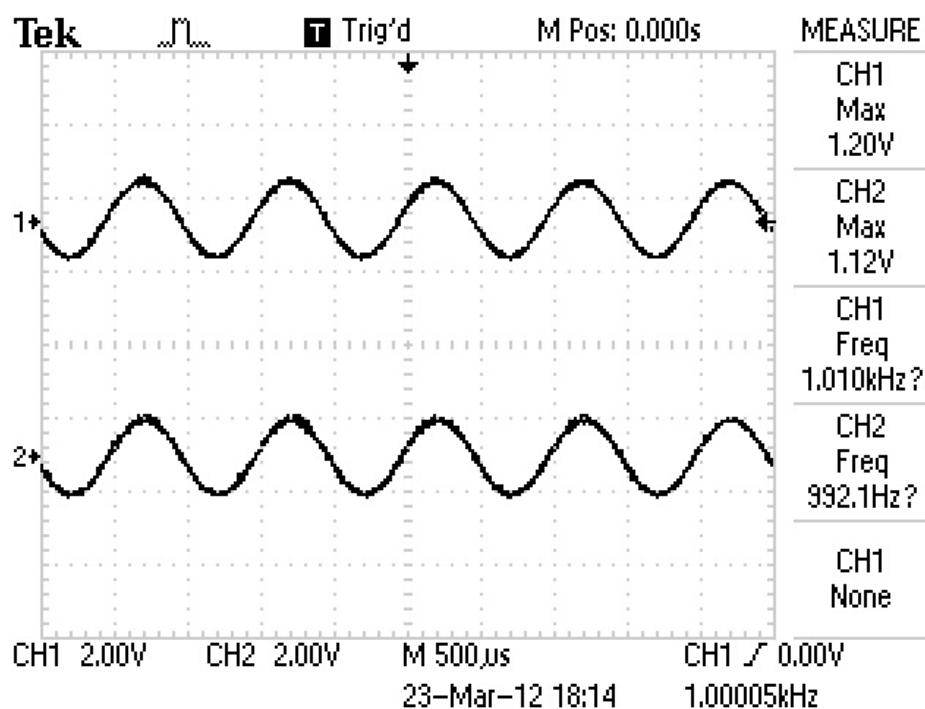


Obrázek 4.17: Graf - výstupní napětí v závislosti na řídicím proudu

#### 4.7.9 Výstup z osciloskopu



Obrázek 4.18: Dvě různé frekvence na výstupu



Obrázek 4.19: Shodné frekvence na výstupu

#### 4.7.10 Závěr

Byla zapojena a změřena aplikace stereo regulátor hlasitosti s použitím operačních transkonduktančních zesilovačů. Na neinvertující vstupy transkonduktančních zesilovačů byly přiváděny signály z generátoru. Pomocí společného řídicího proudu  $I_{ABC}$  se nastavovala velikost napětí na obou výstupech operačních transkonduktančních zesilovačů.

## 5 Závěr

Tato bakalářská práce se zabývala teorií operačního transkonduktančního zesilovače, nebo-li zkráceně OTA. Teoretickým popisem aplikací s využitím operačního transkonduktančního zesilovače a poté samotným praktickým odměřením těchto aplikací.

V teoretické části bakalářské práce jsem se zabýval principem fungování operačního transkonduktančního zesilovače, neideálními vlastnostmi OTA, popisem vnitřní struktury bipolárního OTA, vlastnostmi a využití linearizačních diod v zesilovači. Dále jsme popisovali zapojení oddělovacího zesilovače v operačním transkonduktančním zesilovači a na závěr teoretického popisu jsem se zmínil o MOS OTA.

Druhou částí bakalářské práce je teoretický popis a ukázka schémat sedmi aplikací využívající operační transkonduktanční zesilovač. Popisují se zde základní zapojení a předpokládané chování aplikace, které se projeví při praktickém měření.

V praktické části bakalářské práce se zabýváme již samostatným měřením, dříve teoreticky popsaných aplikací. K praktickému měření jsme si vybrali bipolární operační transkonduktanční zesilovač LM13700, který obsahuje v jednom pouzdře dva zesilovače OTA, linearizační diody a vyrovnávací zesilovač. Napájení našeho OTA bylo ve všech případech  $\pm 10$  V, toto odpovídalo napájení OTA, které je maximálně  $\pm 18$  V. Řídící proud  $I_{ABC}$  a proud protékající linearizačními diodami  $I_D$  nesmí přesáhnout hodnotu 2 mA, což bylo námi dodrženo, jelikož jsme  $I_{ABC}$  nastavovali pravidelně (kromě pár výjimek, které také nepřekročily 2 mA) na 100  $\mu$ A a proud  $I_D$  byl nastaven na 617  $\mu$ A. Z každé aplikace jsme vypracovali samostatný protokol, který obsahoval zadání daného měření, použité přístroje a součástky, postup měření, nastavené parametry. V protokolech byly dále uváděny dle potřeby grafy, vzorce, výstupy z osciloskopu ve formě obrázku a na konci každého protokolu byl napsán závěr, který obsahoval shrnutí a poznatky ze samotného měření dané aplikace.

## 6 Použitá literatura

- [1] PARVEEN, Tahira. *A Textbook of Operational Transconductance Amplifier and Analog Integrated Circuits*. New Delhi - 110 016 (India): I.K. International Publishing House Pvt. Ltd, 2009. ISBN 9789380026558.
- [2] PUNČOCHÁŘ, Josef. *Operační zesilovače v elektronice*. 4., dopl. vyd. Praha: BEN, 1999, 494 s. ISBN 80-860-5637-6.
- [3] Operational transconductance amplifier. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2013-04-24]. Dostupné z: [http://en.wikipedia.org/wiki/Operational\\_transconductance\\_amplifier](http://en.wikipedia.org/wiki/Operational_transconductance_amplifier)
- [4] LM13700 Dual Operational Transconductance Amplifiers with Linearizing Diodes and Buffers. [online]. [cit. 2013-04-24]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm13700.pdf>
- [5] KHN filtr s transadmitančními zesilovači. [online]. [cit. 2013-04-24]. Dostupné z: <http://www.urel.feec.vutbr.cz/MTEO/mteo/02%20KHN%20filtr%20s%20transadmitancnimi%20zesilovaci%20-%20teoreticky%20uvod.pdf>
- [6] Operational Transconductance Amplifiers. [online]. [cit. 2013-04-24]. Dostupné z: <http://synth.stromeko.net/diy/OTA.pdf>
- [7] Application of the Operational Transconductance Amplifier (OTA) to Voltage-controlled Amplifiers and Active Filters. [online]. [cit. 2013-04-24]. Dostupné z: <http://engr.nmsu.edu/~etti/winter98/electronics/grise/wrg.html>
- [8] Integrator. *Wikipedia* [online]. [cit. 2013-04-24]. Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/Integrator>
- [9] HÁJEK, Karel. *Kmitočtové filtry*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2002, 535 s. ISBN 80-730-0023-7.
- [10] Analogové násobičky. *VŠB* [online]. [cit. 2013-04-24]. Dostupné z: <http://fei1.vsb.cz/kat430/old/Studium/Materialy/TPREP/Nasobicky.pdf>